

Quartz-Crystal Cantilevered Resonator for Nanometric Sensing

著者	林 育菁
号	50
学位授与番号	3519
URL	http://hdl.handle.net/10097/37187

氏 名	りん いく せい
授 与 学 位	林 育 菁
学 位 授 与 年 月 日	博士 (工学)
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	平成 1 8 年 3 月 2 4 日
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻
指 導 教 員	Quartz-Crystal Cantilevered Resonator for Nanometric Sensing
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 江刺 正喜
	主査 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 羽根 一博
	東北大学教授 桑野 博喜 東北大学助教授 小野 崇人

論 文 内 容 要 旨

Cantilevered quartz-crystal resonators based on AT-cut quartz crystal were fabricated by a micromachining technology as shown in Figure 1. The novel high sensitive quartz-crystal force sensor with the capability of self-sensing and self-oscillation had a high stability for nanometric sensing was demonstrated. The triangular and rectangular quartz-crystal resonators with thicknesses of 15~27 μm were fabricated by Deep-RIE using a mixture of SF_6 and Xe gases with a Ni mask. A smooth surface and a vertical sidewall were obtained from this technology.

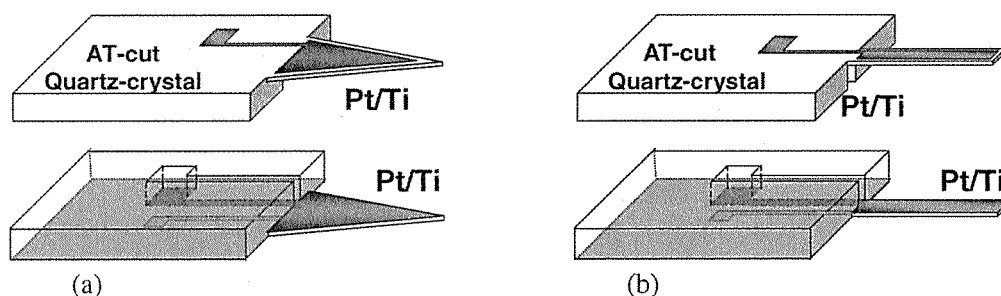


Figure 1 Schematic figure of the (a) triangular and (b) rectangular quartz crystal resonators.

The piezoelectric-induced vibrations of the quartz-cantilevers were characterized. The thickness-shear mode, the main mode that vibrates in the direction of the electrical axis, of quartz-cantilevered resonators could be excited and measured using an impedance analyzer. The flexural and torsional vibrations of the cantilever were also detected from piezoelectric signal by a Laser Doppler vibrometer despite of the weak electromechanical coupling. Our experiments show the possibility that the micromachined quartz crystal sensors operate at various vibration modes.

Thickness-shear mode

The triangular quartz-crystal resonator is aiming at developing the novel high sensitive force sensors. By impedance measurements, the self-oscillation of the thickness-shear modes was demonstrated. The temperature dependence, frequency stability and Q factor stabilities were investigated, which show a high potential ability for using in ambient atmosphere at room temperature. The force sensing principle of using the quartz cantilever is based on the resonant frequency changes. In the case that when an external force is applied, the strain of the mechanically flexible cantilever will induce surface charges and changes its resonant frequency. Figure 2 shows the frequency demodulation signal under various flexural vibration amplitudes. In the FM detection, additional vibration causes the frequency modulation of self-oscillated thickness-shear vibration, which exhibits the force sensing possibility.

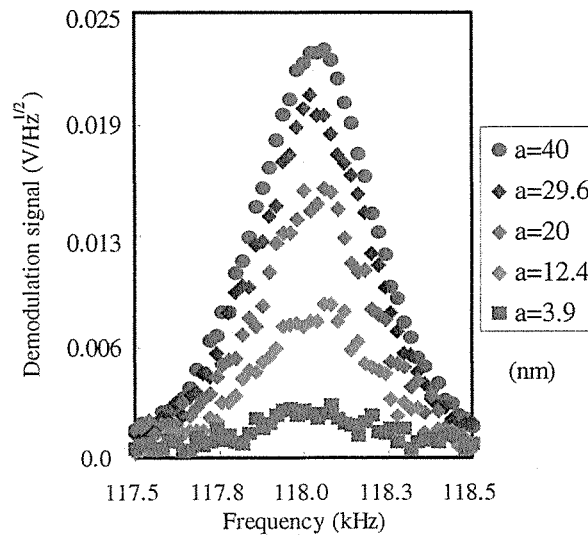
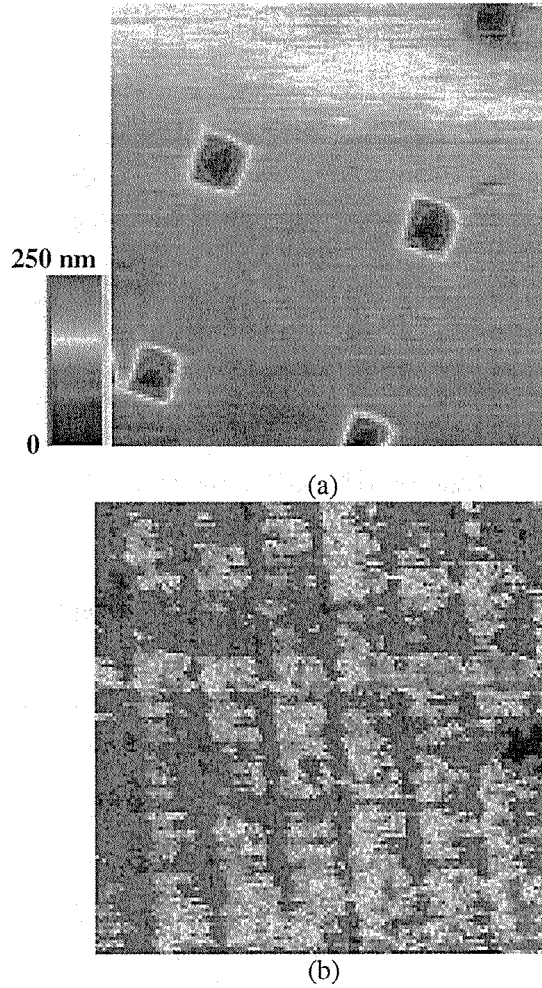


Figure 2 Frequency demodulation signal under various flexural vibration amplitudes.

Flexural and torsional modes

The quartz-crystal resonator was minimized to achieve high force sensitivity. High sensitivity can be obtained by selecting different frequency bands or vibration modes. The low spring constant of the flexural modes of rectangular cantilevers provided a higher sensitivity than that of the conventional quartz tuning forks. The topographic imaging using both the flexural and torsional modes is demonstrated as shown in Figure 3.



Figures 7-6. SPM imaging of (a) the oxide pattern, $10 \times 10 \mu\text{m}^2$, on a silicon substrate measured using a FM detection method with 3rd flexural mode and (b) PLL detection of the Au grid, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, on a Si substrate observed with 1st torsional mode.

As the result, the thickness-shear mode has a high potential ability as a force sensor using in various environments at room temperature. Fabricating quartz-triangular resonator with a high Q factor in thickness-shear vibration mode is expected to provide a high sensitivity and stability for force sensing and nanometric imaging, such as MRFM detection, in various environments. While for the quartz-rectangular resonator, this sensor design can also apply flexural and torsional vibration modes to SPM, friction force microscopy, magnetic force microscopy, etc.

論文審査結果の要旨

半導体微細加工技術を発展させたマイクロマシニング技術を用いると、微細な構造体を製作することができる。片持ち梁は、その共振周波数が外力で変化するため力のセンサとして使えるが、薄くしたり小さくしたりすると、高感度や高空間・時間分解能などの優れた性能を持つ。特に振動エネルギーの散逸を防ぎ Q を高くすると、高感度になり微小量のセンシングが可能になる。

本論文は、微小な力を検出する目的で開発した、水晶の片持ち梁による振動型センサに関する研究をまとめたもので、全編 8 章よりなる。

第 1 章は序論であり、走査プローブ顕微鏡の一種で片持ち梁により微小な原子間力を検知する、原子間力顕微鏡(AFM)について述べている。

第 2 章では水晶について述べている。水晶は圧電性の結晶であるため、電極を付けて交流電界を印加すると振動を励起でき、逆に振動を電圧として検出することもできる。また AT カットと呼ばれる切り出し方をすると、共振周波数が温度に影響されない。

第 3 章では水晶を用いた片持ち梁で、長方形や三角形などの片持ち梁構造による振動子を比較検討した、高感度な振動型センサの設計に関して述べている。

第 4 章は水晶の片持ち梁の製法について説明している。開発した製作工程は、水晶を反応性イオンエッチングによって加工する方法で、 $20\mu\text{m}$ ほどの厚さの共振子を支持部と一体で製作しており、厚みすべり振動の共振周波数は 80MHz 程度のもとなっている。

第 5 章では製作した水晶片持ち梁の振動特性について述べている。目的とする振動モードは厚みすべり振動であるが、このモードでは周囲の空気に振動エネルギーが散逸しにくいいため、大気中でも高い Q が得られている。これは優れた成果であり、このためバイオ関係のような真空中で実験できない場合にも適用できる。なおこれ以外のたわみ振動やねじれ振動などのモードについても実験を行い、振動状態の可視化などによる解析も行っている。

第 6 章では、厚みすべり振動モードの共振周波数が外力に感ずることを確認した実験結果について述べている。外力の振動周波数で周波数変調される実験結果について述べている。共振回路の研究も行い、これらの成果により振動型の高感度な力検出システムを実現している。検出できる $\sqrt{\text{Hz}}$ あたりの最小振幅は $0.03\text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。これは力センサとして高感度なため幅広い応用の可能性があり、優れた研究成果と言える。

第 7 章は開発した水晶による振動型力センサのたわみ振動モードを用いたイメージング実験について述べており、走査プローブ顕微鏡のプローブとして実際に使えることを確かめている。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、水晶のマイクロマシニングによって共振型力センサの開発に成功し、大気中でも使える高感度な力センサを実現したものであり、ナノメカニクス工学とセンサ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。